E/CONF.39/A/379
23 Nov.1962
ORIGINAL : FRANCAIS

CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES
SUR L'APPLICATION DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE
DANS L'INTÉRÊT DES RÉGIONS PEU DÉVELOPPÉES

Point de l'ordre du jour : A. 3. 1. 1

Organisation
pour l'Alimentation et l'Agriculture

TECHNIQUES POUR L'ETUDE ET LES RECHERCHES RELATIVES AUX EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINES DANS LES PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT

Par R. AMBROGGI,
Hydrogéologue,
Organisation des Nations Unies
pour l'Alimentation et l'Agriculture

Les mémoires rédigés à l'intention de la Conférence des Nations Unies sur l'application de la science et de la technique dans l'intérêt des régions peu développées sont des documents de travail. Ils sont publiés tels qu'ils ont été présentés et les assertions et opinions qu'ils contiennent sont celles de leurs auteurs.

NOTES

1. Les mémoires choisis pour être présentés en séance générale pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

2. Les mémoires choisis pour être présentés en séance spéciale pourront être obtenus à la Conférence dans l'une seulement de ces langues officielles.

3. Les résumés qui ont été rédigés pour tous les mémoires par les auteurs de ceux-ci pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

4. Préalablement à la Conférence, les mémoires et les résumés ne feront pas l'objet d'une distribution générale mais d'un tirage restreint destiné aux délégations des gouvernements et autres participants officiels. La publication et la distribution générale des actes de la Conférence s'effectueront conformément aux règles et pratiques agréées par le Comité des publications des Nations Unies.

TECHNIQUES POUR L'ETUDE ET LES RECHERCHES RELATIVES AUX EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINES DANS LES PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT

par

R. Ambroggi,
Hydrogéologue,
Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

Introduction

Nécessité d'un inventaire des ressources en eau

Au moment où va se développer sur un plan international la décennie de l'eau (water decade) il convient de livrer aux divers pays des informations pratiques, utiles à leur développement et à leur contribution à un programme international.

En effet, le développement économique (agricole, industriel) et la croissance démographique déterminent dans tous les pays un accroissement des besoins en eau. Dans les régions arides et semi-arides en particulier, l'eau représente le facteur-clé de limitation du développement. Les pays les plus déshérités sont amenés, dans leur plan économique national, à faire un choix, à priori, en donnant la préférence aux besoins domestiques, plutôt qu'aux besoins agricoles ou industriels. Cependant de récentes études ont montré que la consommation totale d'eau est liée non au climat mais au niveau général de développement économique.

A titre d'exemple, cette consommation, y compris tous les besoins agricoles, domestiques et industriels est de:

15m3/habitant/an	(3,300 Imp. Gal; 4,000 US Gal) en Afrique Tropicale
200m3/habitant/an	(44,000 Imp. Gal; 53,000 US Gal) en Afrique du Nord
500m3/habitant/an	(110,000 Imp. Gal; 130,000 US Gal) en Europe occidentale
1000 m3/habitant/an	(220,000 Imp. Gal; 265,000 US Gal) aux Etats-Unis.

Il est évident, dès lors, que l'inventaire des ressources en eau devrait être la condition préjudicielle à l'établissement d'un plan national de développement et la condition déterminante d'une mise en valeur rationelle et planifiée des disponibilités en eau.

Un tel inventaire exige la mise en oeuvre de techniques ou méthodes de travail spécialisées dans le cadre d'une organisation nationale ou contractuelle.

I - Techniques ou méthodes de travail

Les progrès rapides des sciences hydrologiques et des techniques de recherche et d'utilisation des eaux, au cours des dernières années, répondent à un besoin

de plus en plus général; les moyens matériels étendus consacrés à ces recherches ont rendu ces progrès possibles, et élevé à la fois leur niveau scientifique et leur efficacité.

Les techniques peuvent être rapportées à trois phases de recherche et d'exploitation des eaux:

-Les études préliminaires, qui ressortissent essentiellement aux sciences hydrologiques et hydrogéologiques;
-Les travaux de recherches, qui font appel aux techniques les plus modernes de recherches, de mesure et d'exploitation des eaux;
-L'établissement de l'avant-projet d'aménagement des ressources hydrauliques qui représente la synthèse des deux phases précédentes et s'intègre dans le plan national d'équipement et de développement. Seules les deux premières phases seront traitées.

1. Etudes préliminaires

Ces études, essentiellement documentaires, surtout dans le domaine des eaux de surface, peuvent être conduites plus ou moins simultanément.

Il convient toutefois de distinguer le domaine des eaux de surface, objet de l'Hydrologie au sens strict (1) et celui des eaux souterraines, objet de l'Hydrogéologie.

11. Hydrologie - En hydrologie superficielle l'organisation de la recherche et les méthodes d'études sont maintenant bien établies grâce surtout au développement de l'hydroélectricité et de l'Hydraulique agricole. Dans ce domaine la nécessité d'organismes d'étude permanents n'est pas discutée et on s'attache surtout aujord'hui à des perfectionnements de détail des méthodes et à un développement quantitatif des observations.

11.1 Pluviométrie, climatologie - Presque tous les pays possèdent aujourd'hui des observations météorologiques, surtout pluviométriques, remontant au moins à 20 ans, nombre statistique satisfaisant. Par contre il est peu de pays où le réseau de postes météorologiques est assez dense, ce qui oblige à des interpolations toujours dangereuses.

11.2 Ruissellement - L'étude du ruissellement, aspect le plus classique de l'hydrologie de surface, permet de déterminer le régime des cours d'eau par jaugeage des débits. Encore faut-il que les rivières soient dotées de plusieurs stations de jaugeage et que des mesures valables aient été effectuées à différentes périodes de l'année pendant plusieurs années. Il est alors possible de déterminer directement par analyse statique les caractéristiques désirées.

L'étude d'une zone de 10.000 Km2 normalement drainée et équipée en stations d'observation exige une équipe comprenant un expert ou ingénieur hydrométéorologue et un assistant, travaillant pendant six mois, à raison de: 1 mois-ingénieur +

---

(1) Sens français restreint opposé au sens large de l'Hydrologie "Science qui traite des eaux, de leurs caractéristiques et de leurs propriétés".

1 mois-assistant pour la reconnaissance sur le terrain, 1 mois-assistant pour réunir les observations + 4 mois-assistant pour l'élaboration des résultats, 1 mois-ingénieur + 1 mois-assistant pour les conclusions et le rapport final. Le coût d'une telle opération s'établit aux environs de $ 8,000 à 10,000 (voyages non compris), avec une majoration de 20 à 30% si elle est confiée à un bureau d'études ou d'ingénieurs-conseils.

Malheureusement l'analyse statistique n'est applicable qu'aux cas de rivières pour lesquelles existent 20 à 30 ans d'observations périodiques continues. Or, les pays en voie de développement peu ou pas équipés ne peuvent attendre aussi longtemps pour déterminer leurs ressources en eau de surface. Dans ce cas, on fait appel à la méthode d'étude de la relation "pluie-ruissellement" basée sur le fait que la plupart des pays possèdent des observations pluviométriques sur 20 ou 30 ans. Il suffit alors de posséder des jaugeages périodiques correctement effectués pendant 3 à 5 ans pour établir la relation. Mais cette méthode basée sur le calcul des probabilités présente des dangers évidents. Les conditions de travail sont comparables à celles exposées ci-dessus avec toutefois 2 ou 3 mois supplémentaires d'ingénieur hydrométéorologiste ce qui porte le coût de l'étude à $ 15,000 environ.

12. Hydrogéologie

L'Hydrogéologie est la science qui étudie les eaux souterraines dans leur cadre géologique. Dans beaucoup de pays c'est encore une branche mineure de la géologie appliquée, une matière à recherches temporaires, à "expertises" d'un géologue, plutôt qu'à études prolongées et organisées. Les liaisons et la coopération avec les autres méthodes d'étude des eaux souterraines (hydrodynamique et Hydrochimie des eaux souterraines, notamment) de même qu'avec l'Hydrologie superficielle et la Climatologie, sont encore très insuffisantes, quand elles existent. Ceci a pour conséquence un niveau encore presque exclusivement qualitatif des recherches en de nombreux pays, pour ne rien dire de l'usage encore très répandu de procédés pseudo-scientifiques tels que la radiesthésie.

Au stade préliminaire l'étude hydrogéologique doit comporter notamment une étude géologique, des enquêtes et inventaire de points d'eau, une étude hydrochimique.

12.1 Etude géologique - Il n'est pas nécessaire de développer ici le rôle fondamental du géologue, ou mieux hydrogéologue, dans la recherche hydrogéologique. Son intervention est permanente, et il parait le mieux apte à poser les problèmes et à conduire l'ensemble des études. Son rôle est donc double:

-Direction et coordination des recherches;
-Etudes géologiques proprement dites.

Les missions du géologue consistent: à assimiler et exploiter les études antérieures, à en contrôler la valeur sur le terrain et à effectuer tous les relevés ou observations complémentaires nécessaires (en stratigraphie, en

pétrographie ou en tectonique) (1); à définir les programmes des travaux de recherche, et à les implanter, enfin à définir la situation géologique des points d'eau levés. A ce stade le géologue coopère donc avec les prospecteurs et enquêteurs de points d'eau et les topographes.

L'aboutissement de l'étude géologique est l'établissement d'une carte géologique de reconnaissance mais suffisamment élaborée cependant pour mettre en évidence une stratigraphie détaillée basée sur les faciès, les grandes lignes structurales, les sous-bassins hydrogéologiques caractéristiques (esquisse de la future carte hydrogéologique).

La durée et le coût de cette étude dépendent de la superficie étudiée, des voies d'accès, de l'état des connaissances géologiques antérieures, etc... Cependant à titre d'exemple et pour fixer les idées, dans le cas d'une plaine semi-alluviale de 10.000 Km2, comportant des bordures montagneuses d'accès facile dans un cadre géologique de difficulté moyenne, une équipe comprenant un hydrogéologue expérimenté, un géologue-assistant, deux chauffeurs, deux aides, deux véhicules tous-terrains, achèvera l'étude préliminaire en 12 mois. Le coût local de l'opération peut s'estimer à $ 60.000 (personnel $ 45.000, (2) véhicules: $ 6.000, entretien: $ 3.000, matériel: $ 4.000).

12.2 Enquêtes et inventaire des points d'eau

La prospection hydrogéologique de base, menée parallèlement à l'étude géologique proprement dite, consiste essentiellement dans le relevé des points d'eau (sources, puits) et l'observation de leurs caractères et de leur situation hydrogéologique. Ce travail aboutit à l'établissement d'un inventaire qui est l'expression et la conservation des renseignements recueillis et constitue une archive publique.

Relevé et inventaire doivent obéir à des règles et à des normes rigoureuses: chaque point d'eau relevé doit être situé et identifié avec précision, immatriculé suivant un système simple, extensible à tout le territoire, et servant de base au classement. La plus grande discipline doit être imposée dans l'immatriculation surtout lorsque celle-ci est décentralisée. Le maximum de renseignements doit être recueilli, mais le partage doit être fait et signalé entre les observations directes - obligatoirement datées - et les renseignements indirects, référés.

Le report des renseignements s'effectuera le plus commodément sur fiches accompagnées de cartes. Lorsque le nombre de fiches complètes est assez grand (plus de 10.000) il peut y avoir intérêt à utiliser des cartes perforées facilitant les statistiques et les recherches.

---

(1) Les cartes géologiques établies par les services de la carte géologique doivent être traduites en cartes lithologiques et en cartes tectoniques. Dans ce sens les compléments à rapporter par l'hydrogéologue aux documents géologiques existants consistent surtout en des observations de faciès (particulièrement ceux du Quaternaire) et des précisions sur les pendages (en particulier en bordure d'une plaine)

(2) Hydrogéologue et assistant rémunérés au tarif international. Si tout le personnel était national, la dépense serait de $ 15.000 et le coût total serait de $30.000

Le contrôle périodique de certaines caractéristiques (profondeur du niveau piézométrique de puits, débit de sources, température et analyse chimique) est enfin une des méthodes d'étude les plus rentables au regard de son coût: elle a en hydrogéologie presque autant d'importance que les jaugeages en hydrologie superficielle. Il y a donc un intérêt indiscutable à mettre en place les moyens qui permettent de l'effectuer aussitôt que possible, dès le lancement d'études générales.

Ce contrôle s'exerce soit par des puits témoins sélectionnés, soit par des sondages de reconnaissance, ou exécutés spécialement dans ce but, équipés en piézomètres et parfois munis de limnimètres permanents ou de limnigraphes enregistreurs.

L'aboutissement est l'établissement de la carte piézométrique et des cartes annexes (profondeur, direction d'écoulement, etc....) à diverses périodes. De telles enquêtes seront faites par des agents techniques. Un agent technique entraîné relève 100 à 200 points d'eau/mois, avec prélèvement d'échantillons pour analyse chimique, dans un bassin hydrogéologique déjà exploité par les moyens traditionnels.

A titre d'exemple, la carte piézométrique d'un bassin hydrogéologique de 10.000 Km2 à l'échelle du 1/100.000 ou 1/200.000 exige le relevé de 1000 à 1500 points d'eau pour être expressive, soit sensiblement l'emploi d'un agent technique pendant 1 an (coût local: $ 2000 à 3000) + 1 véhicule tous-terrains (achat et entretien: $ 4.000).

12.3 Etude hydrochimique - L'intérêt de la connaissance des caractères chimiques (quantitatifs et qualitatifs) des eaux, ne réside pas seulement dans l'importance directe de ces données pour l'utilisation de l'eau (consommation ou irrigation). Plus particulièrement dans les pays arides où la concentration des eaux est souvent élevée, une interprétation poussée des résultats d'analyse d'eau est une méthode fructueuse dont les conclusions viennent utilement étayer et recouper les autres.

Dans le cadre des levés préliminaires un soin particulier sera donc apporté au prélèvement des échantillons d'eau qui devrait être systématique et souvent périodique (contrôle des variations de concentration et de composition). Les prélèvements seront effectués sur le terrain par l'agent technique chargé de l'enquête sur les points d'eau.

Les attributions propres du chimiste (laboratoire) sont ensuite:

-L'exécution des analyses d'eau suivant des méthodes fidèles et invariables; analyse complète (6 ou 7 ions principaux, Ph, degré hydrothimétrique, résidu sec.)
-La représentation graphique des résultats d'analyse suivant des modes appropriés (diagrammes logarithmiques, triangulaires, en losange)
-Enfin l'étude des répartitions dans l'espace des concentrations et de leurs relations avec les sens d'écoulement des nappes (construction de cartes hydrochimiques) puis la définition des faciès hydrochimiques, le calcul des rapports d'ions caractéristiques, et l'étude de leurs relations avec l'aquifère et la concentration, ainsi qu'avec les qualités des eaux de surface, exigent une étroite coopération entre le chimiste et le géologue.

On peut ainsi obtenir des indications précieuses pour l'étude des modes d'alimentation et de décharge des nappes d'eau souterraine: au stade de l'interprétation finale, la collaboration du chimiste avec l'hydrogéologue et l'hydraulicien est indispensable.

Moins riche de conclusions que l'étude chimique, l'étude thermique des eaux souterraines n'est pourtant pas à négliger, en particulier le contrôle du régime thermique, trop rarement exercé. Les anomalies positives ou négatives observées sont en effet des indices sûrs d'apports d'origine profonde ou superficielle. Ces données contribuent à définir le mode d'alimentation d'une nappe.

L'aboutissement des études hydrochimiques et thermiques est l'établissement des cartes et documentation hydrochimiques et de la carte hydrothermique. Les études seront assurées par un chimiste spécialiste des eaux et un laborantin. Le rythme d'exécution des analyses complètes d'eau est de 5 analyses/jour/personne. Le plus souvent tout le travail d'analyse sera exécuté par le laborantin qui est employé à temps plein pendant 1 an pour un bassin comportant 1000 prélèvements environ. La présence du chimiste est nécessaire durant les 6 derniers mois pour contrôler les analyses par sondage et faire les synthèses requises.

Le coût total de l'étude hydrochimique ainsi définie s'élèverait à $ 25.000 (équipement d'un laboratoire d'eau: $ 10.000, chimiste $ 11.000, laborantin: $ 4.000).

13. Etudes et méthodes annexes

Ces études peuvent être préalables ou complémentaires des précédentes, sans être toutefois systématiques. Cependant, elles sont souvent utiles et parfois indispensables. Sans énumérer une liste exhaustive, citons cependant: la photographie aérienne, l'usage des traceurs chimiques et radioactifs, la géomorphologie, la paléontologie, les radioisotopes utilisés comme "dateurs" pour déterminer l'âge des eaux souterraines, etc...

13.1 Topographie et photographie aérienne - L'inexistence des documents cartographiques et la nécessité de posséder, dès le début des études, des documents de base de travail, conduisent à rechercher les moyens les plus rapides. La photographie aérienne permet de posséder un premier document de reconnaissance qui peut être complété par la cartographie obtenue à partir de l'interprétation photogrammétrique. Pour une superficie moyenne de 10.000 Km2 par exemple, une couverture aérienne à l'échelle du 1/50 000 revient sensiblement à $ 4 par Km2; pour la photo aérienne avec recouvrement stéréoscopique à 66%, une carte par interprétation photogramétrique, en courbes de niveau d'intervalles de 10 m, à la même échelle de 1/50 000, revient sensiblement à $ 5 par Km2.

13.2 Usage des traceurs chimiques et radioactifs - Ils peuvent être employés pour le jaugeage des cours d'eau et pour déterminer les circuits souterrains principalement dans les nappes à circulation karstique. Dans ce dernier domaine l'emploi des traceurs chimiques ou radioactifs est une contribution essentielle à la détermination des zones d'alimentation, de la durée d'emmagasinement souterrain des eaux et de la connaissance des divers exutoires possibles d'une même nappe. L'emploi des traceurs radioactifs exige certaines précautions, dans l'intérêt des populations.

Divers radioisotopes peuvent être recommandés. Parmi eux le tritium artificiel paraît le plus choisi. Une opération de traçage radioactif au moyen du tritium coûte sensiblement de $ 6.000 à $ 10.000, compte tenu de la fourniture du produit, de l'opération d'injection, des prises d'échantillons échelonnées sur un an par diverses équipes, et des analyses en laboratoire spécialisé.

13.3 Géomorphologie - Une connaissance approfondie de la géomorphologie peut être utile à la connaissance de l'évolution des niveaux de base qui ont souvent conditionné l'évolution parallèle des systèmes aquifères superficiels ou souterrains. L'étude géomorphologique peut apporter, en outre, des renseignements précieux sur la détermination des zones d'alimentation, des zones d'exutoires et des différents traits structuraux qui définissent souvent les bassins aquifères. Une étude d'un mois, par un spécialiste, suffit en général pour définir les grandes lignes, soit environ $ 2.000.

13.4 Micropaléontologie - Elle est souvent utile, pour ne pas dire nécessaire, pour déterminer l'âge et donc la position stratigraphique, des niveaux aquifères recherchés par sondages et pour la corrélation des divers sondages entre eux. L'étude micropaléontologique exige, dans un sondage, une prise d'échantillon, tous les mètres, ou tous les 10 mètres, suivant le degré de précision recherché, le lavage de marnes et l'examen au microscope des microfaunes. Ce travail doit être nécessairement confié à des spécialistes; le coût sera fixé par échantillon examiné.

13.5 Les radioisotopes comme "dateurs" - La connaissance rigoureuse des réservoirs souterrains, de leur alimentation et de leur débit, conditionne le mode et le taux d'exploitation de ces réservoirs. Outre les méthodes connues, il conviendrait d'aborder un domaine nouveau qui est celui de l'âge des eaux souterraines. Cette idée provient d'une hypothèse de base selon laquelle l'eau souterraine serait stratifiée; chaque couche aquifère pouvant être d'âge différent, on en arriverait ainsi à la notion de "stratigraphie" des eaux souterraines. Plusieurs radioisotopes peuvent être employés à cet effet: Le C14 pour les eaux très anciennes (supérieures à 20.000 ans), la famille Cobalt-Thorium pour les eaux comprises entre 100 ans et 20.000 ans, leTritium naturel pour les eaux inférieures à 100 ans et le Tritium artificiel (produit par explosion nucléaire des bombes à hydrogène) pour les eaux souterraines formées depuis 1952, date de la première explosion de bombe H.

2. Travaux de recherche

Les études préliminaires auront permis:

- -Une interprétation, une confrontation et une synthèse provisoire des observations recueillies;
- -Un recensement des inconnues et des problèmes posés;
- -L'élaboration d'hypothèses de travail;
- -L'établissement d'un programme de travaux de recherche en fonction à la fois des hypothèses à vérifier et des buts économiques de recherche, après réappréciation éventuelle des problèmes techniques posés initialement.

Il suffira alors de procéder aux travaux d'étude qui permettront de compléter les observations et de lever les inconnues.

21 - Eaux de surface

21.1 Réseaux de pluviomètres - Un réseau normal d'observation des précipitations sera mis en place. En bonne règle, un tel réseau, sur une zone-type de 1.000 Km2 doit comporter 100 pluviomètres ordinaires, 4 à 5 pluviomètres totalisateurs et 1 pluviomètre enregistreur. Le prix de revient est de $ 12 pour un pluviomètre ordinaire; $ 40 pour un pluviomètre totalisateur et de $ 130 pour un pluviomètre enregistreur. A ces dépenses doivent normalement s'ajouter le salaire des agents responsables des observations.

21.2 Hydrométrie - C'est la mesure des débits des eaux de surface, aussi bien sources que rivières et fleuves. Ces mesures peuvent s'effectuer soit à l'aide de moulinets en pré-reconnaissance, soit au moyen de stations permanentes de jaugeage. Ces stations de jaugeage peuvent être simplifiées à l'extrême; le coût de l'équipement sera alors de l'ordre de $ 1.000 par station. Ou bien les stations de jaugeage pourront faire l'objet d'un équipement plus poussé et être dotées d'appareils d'enregistrement automatique. Il est difficile de déterminer un prix de revient qui dépend essentiellement des conditions locales, toutefois, dans un ordre de grandeur, une telle station peut être établie à un prix de revient compris entre $ 10.000 et 1.000.

22 - Eaux souterraines

22.1 Géophysique - L'Hydrogéologue doit faire appel à la géophysique dans tous les cas de bassins alluviaux où les dépôts récents masquent les couches géologiques et interdisent toute interprétation de la structure et de la profondeur de celles-ci. En règle générale toute prospection géophysique doit être menée en collaboration étroite et permanente avec l'Hydrogéologue, aussi bien durant la prospection qu'au moment de l'interprétation. Les divers modes de prospection géophysique doivent être employés judicieusement suivant les problèmes posés.

-En Hydrogéologie, les méthodes géophysiques d'exploration des structures profondes (gravimétrie, magnétisme) sont rarement employées bien qu'elles puissent économiquement aider les recherches ultérieures. Dans quelques cas, ces méthodes peuvent être intéressantes à condition toutefois d'obtenir une densité élevée de points de mesure. Les deux méthodes les plus couramment utilisées sont:

-La résistivité électrique par sondages électriques, plus spécialement dans l'étude des terrains alluviaux ou argilo-sableux, pour des profondeurs ne dépassant pas 500 à 1.000 mètres. Dans certains cas la méthode par "Trainés" sera moins onéreuse. Des carottages électriques des sondages compléteront efficacement cette méthode.

-La sismique réfraction sera utilisée dans les études des structures de terrains durs aquifères calcaires, sous une couverture imperméable ou dans le cas de substratum de bassin sédimentaire ou de plaine d'effondrement.

De toute façon, ces prospections doivent être soigneusement préparées par une étude géologique (lithologique et structurale) portant sur les affleurements des terrains qui doivent en profondeur influencer les mesures physiques (densité,

différence de potentiel, élasticité). Des sondages de pré-reconnaissance, un peu analogues aux "core drill" des pétroliers, peuvent dans certains cas hâter l'interprétation des mesures géophysiques, en permettant leur étalonnage préalable. Mais le plus souvent une étude par géophysique extensive suivra l'étude géologique, puis un ou plusieurs sondages (carottés électriquement si possible) permettront de rectifier l'image interprétative obtenue, et de préciser les zones où une étude géophysique de détail sera nécessaire.

Dans cette phase, il appartient au géophysicien de critiquer le choix de la méthode proposée par le géologue et de préciser le mode d'application de cette méthode (longueur de ligne d'envoi de courant, charge d'explosif...) et au géologue de réviser les interprétations tectoniques et lithologiques auxquelles il était parvenu sur la base des diverses interprétations géométriques que lui propose le géophysicien: ils doivent apprendre à travailler ensemble.

Des deux méthodes ainsi définies, celle par résistivité électrique est la moins onéreuse, et par conséquent la plus recommandée pour les reconnaissances hydrogéologiques. Son prix de revient est sensiblement de 3.000 à 5.000 dollars par équipe/mois, y compris l'équipement. Une équipe bien entraînée peut exécuter 80 à 100 sondages électriques/mois à des profondeurs moyennes de 200 à 500 mètres et 100 à 150 sondages électriques/mois à des profondeurs égales ou inférieures à 100 mètres.

Le coût de la méthode par sismique-réfraction est de $ 10.000 à $ 15.000 par équipe/mois.

22.2 Sondages - Les sondages sont de toute façon nécessaires pour préciser, rectifier ou modifier l'interprétation géologique des mesures géophysiques. Ces sondages utiles en pré-reconnaissance seront de toutes façons indispensables pour connaître les caractéristiques hydrodynamiques des terrains et des nappes aquifères que la géophysique ne peut donner que dans des cas tout à fait exceptionnels.

Dans un premier stade (reconnaissance) le forage sera réalisé en petit diamètre avec de nombreux carottages mécaniques et si possible un carottage électrique (aide du géophysicien pour l'interprétation de ce document), pour permettre au géologue d'établir une coupe type rigoureuse. Puis les premiers renseignements sommaires ayant été obtenus sur les caractéristiques hydrogéologiques des terrains (pertes d'eau, niveau hydrostatique, température et qualités chimiques des différentes nappes) un programme d'étude sera établi (diamètre d'alésage, tubage, crépinage, développement, pompage d'essai). Dans une étude systématique d'une nappe phréatique, un forage d'étude peut être équipé d'un tube piézomètre.

Pour les nappes déjà mieux connues par des forages de reconnaissance précédents, on pourra dès l'abord exécuter le forage en son diamètre définitif. Mais ce forage dit d'exploitation conserve, en raison de l'hétérogénéité des terrains, le caractère d'un forage d'étude jusqu'à ce que l'hydraulicien, ayant interprété les essais de débit, puisse le livrer aux ingénieurs chargés de l'équipement, avec ses caractéristiques de pompage.

La proportion de ces divers types de forage dans l'étude d'un bassin variera avec le type du réservoir aquifère et avec l'état d'avancement des études.

L'étude progressant en fonction des résultats apportés par les sondages, un programme de travaux doit toujours être souple et prévoir différentes possibilités.

L'Hydrogéologue prépare ce programme en fonction du renseignement à obtenir, du problème à résoudre. Il implante les forages, établit la coupe lithologique et géologique et reste en relation étroite avec l'ingénieur chargé des sondages et avec l'hydraulicien pour la mise au point et l'adaptation éventuelle des différents essais. Ce travail à trois qui commence au moment de la préparation de l'appel d'offres, se poursuit avec la mise au point des termes du marché et se concrétise au cours de la réalisation du sondage d'étude, vise à en obtenir le maximum de renseignements, dans le cadre du marché établi.

Ainsi l'Hydrogéologue doit d'une part choisir en fonction du problème particulier qu'il a à traiter, la puissance et le type d'appareil (battage à sec ou à l'eau claire, rotary avec injection d'air ou d'eau claire - carottage continu) et connaître les différentes possibilités techniques du matériel de sondage à sa disposition. Il doit d'autre part connaître les incidences financières de ses exigences et tenir compte d'un rapport raisonnable entre le coût des travaux d'étude et celui de l'équipement pour l'exploitation.

Le prix de revient des sondages est assez difficile à déterminer, car il est fonction de l'éloignement des bases, des conditions d'accès, des facteurs de climat, des incidents techniques, de la coopération et de la coordination des diverses techniques et opérations, etc... Cependant, à titre indicatif, dans les terrains rocheux ou meubles et cohérents, des sondages de pré-reconnaissance et de reconnaissance en carottage, exécutés à une profondeur moyenne de 100 mètres, en petit diamètre (inférieur à 6 pouces) reviendraient entre $ 30 et $ 40 du mètre, toutes prestations et fournitures comprises. Les mêmes sondages reviendraient à $20/mètre au rotary. Les forages d'exploration exécutés à des diamètres compris entre 6 et 10 pouces à des profondeurs moyennes de 100 mètres ont des prix de revient compris entre $ 40 et $ 80 par mètre; enfin les sondages d'exploitation en diamètre supérieur à 12 ou 14 pouces à des profondeurs moyennes de 100 mètres s'établissent entre 80 et $120 par mètre, toutes fournitures et prestations comprises. Dans les terrains meubles sans cohésion (alluvions, etc...) pour des profondeurs moyennes de 50 m, les prix seraient de $ 45 en percussion à l'eau claire, diamètre de 3 à 7", de $ 60-70 en percussion à circulation directe, diamètre 16 à 20", de $ 90, en percussion à circulation inverse, diamètre de 20 à 32".

22.3 Essais de débit - Le principal but pratique de la recherche hydrogéologique est l'évaluation quantitative des ressources en eau souterraine et des possibilités d'exploitation. Ce doit être la tâche de l'Hydraulicien spécialisé en hydraulique souterraine, en étroite collaboration avec l'Hydrogéologue. Les moyens d'investigation dont dispose l'Hydraulicien pour définir et chiffrer les principales caractéristiques numériques des nappes aquifères sont: perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinage et l'essai de débit qui doit être effectué aussitôt après l'exécution du sondage d'exploration ou d'exploitation. Le but des essais de débit en fin de sondage est de déterminer les caractéristiques d'exploitation d'un ouvrage et l'équipement définitif des stations de pompage; pour cela les essais permettront de définir chaque niveau aquifère par son débit spécifique, et les volumes d'eau qu'il est possible d'exorer.

Un essai de débit pour être interprétable doit être conduit pendant plusieurs heures et quelquefois plusieurs jours ou plusieurs mois suivant les caractéristiques du terrain et l'importance de l'exploitation à déterminer. Dans tous les cas un essai de débit n'est valable que lorsque pour un débit de pompage constant, on a obtenu, après un certain temps, une stabilisation ou une quasi-stabilisation du niveau piézométrique. Le prix de revient de ces essais de débit s'établit entre $ 10 et $ 20 par heure de pompage pour des débits compris entre 5 et 30 l/s.

II. ORGANISATION

Principes généraux d'organisation. Ces études et travaux, ainsi que les techniques qu'ils impliquent, peuvent être conduits soit dans le cadre d'une mission régionale à caractère temporaire, soit dans le cadre d'un service national à caractère permanent, la seconde formule pouvant être la cristallisation de la première.

Ces diverses techniques devraient être réunies dans un même organisme dont le rattachement organique dépendrait des structures administratives et économiques locales propres à chaque pays. Trois principes directeurs paraissent essentiels:

a) Subordonner cet organisme à une administration ou à un établissement à but économique afin d'orienter les recherches vers des buts pratiques, mais conserver une autonomie assez grande pour permettre les recherches de caractère général et à long terme.

b) Combiner en permanence l'étude des eaux de surface et des eaux souterraines avant d'établir le choix des priorités.

c) Décentraliser autant que possible le service au fur et à mesure de son développement en centres régionaux adaptés à des régions naturelles homogènes.

1. Mission régionale. Elle aura un caractère en principe temporaire avec pour mission de déterminer au plus vite les ressources en eau de surface et souterraine pour une région bien délimitée, présentant un caractère de priorité dans le cadre national de mise en valeur. Cette mission régionale devra comprendre en principe un hydrogéologue, Chef de mission, un hydrologue et deux agents techniques pour les eaux de surface, deux agents techniques pour les eaux souterraines, un topographe, un commis, un secrétaire, un ou plusieurs chauffeurs, deux ou trois véhicules. Les travaux d'installation de stations de jaugeage, de prospection géophysique, de sondages et d'essais de débit, doivent, en principe, être sous-contractés. Cette mission à caractère temporaire devrait être prévue en principe pour deux ou trois ans suivant les exigences. Elle serait ensuite transformée en service régional à mission permanente et son effectif serait alors réduit à:

1 Hydrogéologue Chef de Service
2 Adjoints techniques
1 Commis
1 Secrétaire

L'avantage de cette formule est de constituer le noyau ou base de départ de l'organisation pour l'inventaire des ressources en eau dans un pays. Elle peut être répétée et multipliée en fonction des impératifs économiques jusqu'à constituer un service national.

2. Service national. Quel que soit le rattachement organique de ce service national, sa mission essentielle sera la recherche, l'étude et la surveillance des eaux de surface et souterraines, en vue d'aboutir à l'inventaire et à

l'exploitation de toutes les ressources en eau du pays. Cette mission peut se subdiviser en trois options, également nécessaires:

- mission permanente d'inventaire et de contrôle des ressources en eau du pays;

- mission de service public avec un double rôle de bureau d'étude et d'ingénieur conseil;

- mission de recherche scientifique théorique ou appliquée.

Un tel service national se décomposera en un service central établi dans la capitale et un certain nombre de services régionaux. Le service central se composera:

- d'une direction chargée des programmes, du budget, des liaisons extérieures, du contrôle des centres régionaux et de l'administration générale;

- de plusieurs bureaux ou organes spécialisés:

  . bureau d'inventaire de ressources en eau (fichier central constituant une archive publique);

  . bureau de climatologie et d'hydrologie (documentation et liaisons);

  . laboratoire central d'hydrochimie;

  . section d'hydraulique souterraine, dirigeant et gérant un service ou un groupement d'essais de débit, chargé de toutes études et expérimentations sur l'hydrodynamique des eaux souterraines;

  . bureau des travaux de recherche, chargé de la planification et du contrôle des travaux de sondage et de prospection géophysique.

- d'un bureau de documentation et d'une bibliothèque;

- d'un secrétariat aux relations scientifiques;

- d'un bureau de publication;

- d'un secrétariat administratif.

3. Les Services régionaux. seront les principaux organes d'action. On détaillera donc un peu plus leur mission:

- Inventaire méthodique des points d'eau et des ressources en eau; tenue d'un fichier régional et liaison avec le fichier central.

- Contrôle périodique de l'état des nappes (niveau piézométrique, hydrochimie); conservation et interprétation des résultats d'observation; signalement périodique de l'état des nappes, contrôle technique des exploitations d'eaux souterraines, ce qui implique un pouvoir légal d'enquête sur les exploitations par les particuliers, distinct du pouvoir de réglementation.

- Etude hydrogéologique systématique du territoire dans le cadre de chaque région naturelle, étendue à tout ce qui a trait aux eaux souterraines. Synthèse des connaissances et expression par des cartes hydrogéologiques régionales.

- Etudes régionales ou locales à objectifs définis, dans le cadre du programme fixé par le service central, ou en réponse à des demandes formulées par des services publics locaux, des collectivités ou des particuliers.

- Préparation, contrôle et interprétation des travaux de recherche ou d'exploitation, en liaison avec le service central.

- Tenue d'archives documentaires, techniques et administratives.

- Conservation des échantillons recueillis au cours des études ou des sondages, constituant une collection géologique régionale.

CONCLUSION

La mise en oeuvre des techniques définies plus haut, dans le cadre d'une organisation à caractère temporaire ou permanent contribuera à plus ou moins long terme à la connaissance approchée, sinon exacte, des ressources en eau et des disponibilités exploitables d'un pays. Ce facteur primordial à l'établissement de tout plan de développement économique et national représentera la valeur du "Capital Eau" dont dispose le pays et permettra d'en déduire le revenu en fonction de l'aménagement des ressources, aménagement qui implique un certain investissement, et dont le numérique qui précède concernant le prix de revient des études et travaux nécessaires à l'établissement de cet inventaire, fait apparaître la modicité des sommes à investir pour parvenir à la connaissance des ressources en eau et à l'établissement d'un avant-projet d'aménagement hydraulique du pays. Le pays doit prendre conscience de cette nécessité.

BIBLIOGRAPHIE

R. Ambroggi, R. Hazan, J. Margat, F. Mortier - Association Internationale Hydrologie Scientifique, eaux souterraines dans les zones arides pp. 7 à 17. Publication No. 57 AIHS.

R. Ambroggi et J. Margat - Le Centre des Etudes Hydrogéologiques, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc No. 153.

R. Ambroggi et J. de Mèredieu - Rôle of Hydrological Surveys - Rapport FAO pour le Congrès Alimentaire Mondial, Washington, 1963.

1816 F - Nov. 1962 - 1,000